

---

**INTERAZIONE DELLE ERUZIONI  
SOLARI CON I PERCORSI DEL  
SEGNALE AUDIOFILO: EFFETTI  
DELLE TEMPESTE  
GEOMAGNETICHE SULLE  
PRESTAZIONI DEI CAVI AUDIO**

---

# Interazione delle eruzioni solari con i percorsi del segnale audiofilo: effetti delle tempeste geomagnetiche sulle prestazioni dei cavi audio

S. Magnusson, M. Ferro, C. Ohm

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2023.

## Abstract

Le tempeste geomagnetiche indotte dalle espulsioni di massa coronale (CME) solari producono fluttuazioni rapide nel campo magnetico terrestre che possono superare i 500 nT/minuto durante eventi severi ( $K_p \geq 7$ ). Dimostriamo che queste fluttuazioni sono rilevabili come variazioni di impedenza misurabili nei cavi audio con bias emisferico, e che i cavi magneticamente neutri sono intrinsecamente immuni a questo effetto. Il monitoraggio continuo di 12 cavi (3 per livello: Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) durante la tempesta geomagnetica di ottobre 2024 ( $K_p = 8,3$ ) ha rivelato fluttuazioni di impedenza fino allo 0,08% nei cavi di livello Tropic, dello 0,003% nei cavi di livello Equinox e al di sotto del rumore di fondo ( $< 0,0001\%$ ) nei cavi Zero-Point. Proponiamo un Indice di Attività Solare per le specifiche prestazionali dei cavi audio.

## 1. INTRODUZIONE

Il ciclo di attività undecennale del Sole produce massimi periodici nella frequenza e nell'intensità delle eruzioni solari e delle espulsioni di massa coronale (CME). Quando il campo magnetico di una CME interagisce con la magnetosfera terrestre, la tempesta geomagnetica risultante può produrre fluttuazioni rapide e di grande ampiezza nel campo magnetico superficiale. L'attuale ciclo solare (Ciclo 25) sta producendo un'attività più forte del previsto, con diverse tempeste  $K_p \geq 7$  registrate nel 2024.

Queste fluttuazioni geomagnetiche sono ben documentate come fonte di interferenza nelle reti elettriche (correnti indotte geomagneticamente), nei sistemi di monitoraggio della corrosione delle tubazioni e nella magnetometria di precisione. Ciò che non è stato indagato è il loro effetto sui cavi del segnale audio.

Il meccanismo è semplice: un cavo audio con bias emisferico contiene conduttori la cui struttura cristallina ha un orientamento preferenziale rispetto al campo magnetico terrestre. Quando il campo cambia rapidamente -- come durante una tempesta geomagnetica -- la relazione tra l'orientamento dei grani e il campo si sposta, producendo una variazione transitoria nell'impedenza effettiva del conduttore. Questa modulazione dell'impedenza appare come una modulazione indesiderata del segnale audio.

I cavi magneticamente neutri, per definizione, non hanno un orientamento preferenziale dei grani. Dovrebbero essere immuni a questo effetto perché non esiste un accoppiamento direzionale tra la struttura cristallina e il campo esterno. Questo articolo verifica tale ipotesi.

## 2. METODOLOGIA

Dodici campioni di cavo (1,0 m ciascuno, interconnessioni con terminazione RCA) sono stati installati in una stanza non schermata magneticamente presso la struttura di Equatorial Audio. Tre cavi per livello (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) sono stati collegati a un sistema di monitoraggio continuo dell'impedenza basato su un analizzatore di impedenza Keysight E4990A operante a 1 kHz con intervalli di misurazione di 5 secondi.

I dati simultanei del campo magnetico sono stati registrati da un magnetometro fluxgate triassiale Bartington Mag-13 posizionato a 1 m dall'array di cavi.

La campagna di misurazione si è svolta ininterrottamente dal 15 settembre al 15 novembre 2024, raccogliendo 5,3 milioni di misurazioni di impedenza per cavo. Il periodo ha incluso tre tempeste geomagnetiche: 18 settembre ( $K_p = 5,7$ ), 10-12 ottobre ( $K_p = 8,3$ , la tempesta più forte del Ciclo 25 fino ad oggi) e 3 novembre ( $K_p = 6,1$ ).

L'analisi di cross-correlazione tra il tasso di variazione del campo magnetico (dB/dt) e la deviazione dell'impedenza del cavo (dZ/Z) è stata eseguita utilizzando finestre scorrevoli di 60 secondi.

## 3. RISULTATI

Durante la tempesta del 10-12 ottobre ( $K_p = 8,3$ ), sono state registrate le seguenti deviazioni massime di impedenza:

Livello Tropic: 0,082 +/- 0,008% (media di 3 campioni)

Livello Meridian: 0,031 +/- 0,004%

Livello Equinox: 0,0033 +/- 0,0005%

Livello Zero-Point:  $< 0,0001\%$  (sotto il rumore di fondo)

La cross-correlazione tra dB/dt e dZ/Z è risultata significativa per i livelli Tropic ( $r = 0,71$ ,  $p < 0,0001$ ), Meridian ( $r = 0,54$ ,  $p < 0,0001$ ) ed Equinox ( $r = 0,23$ ,  $p < 0,01$ ). Non è stata trovata alcuna correlazione significativa per Zero-Point ( $r = 0,02$ ,  $p = 0,34$ ).

La deviazione dell'impedenza è scalata linearmente con il prodotto dell'HBA del cavo e il tasso di variazione del campo magnetico:  $dZ/Z$  è approssimativamente uguale a  $k \times HBA \times dB/dt$ , dove  $k = 2,1 \times 10^{-6} \text{ (deg} \times \text{min/nT)}$

Durante i periodi magneticamente quieti ( $Kp \leq 2$ ), nessun livello di cavo ha mostrato deviazioni di impedenza al di sopra del rumore di fondo.

## 4. DISCUSSIONE

I risultati confermano l'ipotesi: i cavi con bias emisferico sono sensibili alle tempeste geomagnetiche e la sensibilità è proporzionale all'entità del bias. I conduttori con giunzione equatoriale del livello Zero-Point, con il loro HBA inferiore a  $0,00001 \text{ deg}$ , sono effettivamente immuni all'attività solare. Questa immunità non è ottenuta attraverso la schermatura (che può attenuare ma non eliminare l'accoppiamento del campo esterno) ma attraverso l'assenza fondamentale di struttura cristallina direzionale.

La rilevanza pratica di una fluttuazione di impedenza dello  $0,08\%$  durante una tempesta severa è discutibile. A  $-62 \text{ dB}$  rispetto al segnale, è al di sotto della soglia di udibilità per toni stazionari. Tuttavia, la fluttuazione non è stazionaria -- è modulata dalla struttura temporale caotica della tempesta geomagnetica, producendo una contaminazione simile al rumore che potrebbe essere percepibile come una sottile perdita di chiarezza o precisione spaziale durante il picco dell'attività della tempesta.

Proponiamo che i produttori di cavi adottino un Indice di Attività Solare (SAI) che specifichi la deviazione massima di impedenza per unità di disturbo geomagnetico:  $SAI = \max(dZ/Z) / \max(dB/dt)$ . Valori più bassi indicano maggiore immunità. Il livello Zero-Point raggiunge  $SAI < 10^{-6}$ , che designiamo come "Grado Solare".

Le cuffie Solar Flare di Equatorial Audio, che incorporano il monitoraggio in tempo reale dell'attività solare e la compensazione adattiva della risposta in frequenza, rappresentano un approccio alternativo per gli ascoltatori che utilizzano cavi non di Grado Solare.

## 5. CONCLUSIONE

Le tempeste geomagnetiche producono fluttuazioni di impedenza misurabili nei cavi audio con bias emisferico. L'effetto scala con l'entità del bias e l'intensità della tempesta. I cavi magneticamente neutri ( $HBA < 0,00001 \text{ deg}$ ) sono immuni. Raccomandiamo l'adozione di un Indice di Attività Solare standardizzato per le specifiche prestazionali dei cavi audio.

## RIFERIMENTI

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Bias emisferico nell'orientamento dei grani di rame," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] NOAA Space Weather Prediction Center, "Scale delle tempeste geomagnetiche," <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>.
- [3] D. H. Boteler, R. J. Pirjola, "Correnti indotte geomagneticamente (GIC)," Space Weather, vol. 15, pp. 258-276, 2017.
- [4] J. L. Barton, "Effetti delle tempeste geomagnetiche sui sistemi tecnologici," Space Weather, vol. 1, no. 2, 2003.
- [5] S. Magnusson, C. Ohm, "Compensazione audio adattiva in tempo reale per i disturbi geomagnetici," Equatorial Audio Technical Note EA-TN-012, 2023.